

⑯ BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



⑯ **Gebrauchsmuster**

U 1

- (11) Rollennummer G 90 17 745.2
(51) Hauptklasse G01N 21/01
(22) Anmeldetag 07.12.90
(23) aus P 40 39 080.2
(47) Eintragungstag 05.12.91
(43) Bekanntmachung
im Patentblatt 23.01.92
(54) Bezeichnung des Gegenstandes
Meßzelle zur Mehrfachreflexion
(71) Name und Wohnsitz des Inhabers
Drägerwerk AG, 2400 Lübeck, DE

B e s c h r e i b u n g

D r ä g e r w e r k Aktiengesellschaft
Moislinger Allee 53-55, 2400 Lübeck, DE

Meßzelle mit Mehrfachreflexion

Die Neuerung betrifft eine Meßzelle mit zwei parallelen, einander zugewandten konkaven Spiegeln auf der optischen Achse, mit Krümmungsradius R und Spiegel-Abstand d , auf der optischen Achse, zwischen denen eine Mehrfachreflexion der optischen Strahlung erfolgt und mit Fenstern in den Spiegeln, zum Eintritt der optischen Strahlung aus einer Strahlungsquelle und Austritt der optischen Strahlung auf einen Detektor.

Eine Meßzelle mit zwei einander zugewandten Spiegeln, zwischen denen eine Mehrfachreflexion der benutzten optischen Strahlung erfolgt, ist aus der DE-C2 29 37 352 bekanntgeworden. Die bekannte Meßzelle wird als Multipaß-Anordnung bei der Absorptions-Fluoreszenz- und Raman-Spektroskopie verwendet, wobei das zu analysierende Gas in eine Meßkammer geleitet wird, die zwischen zwei konvexen Körpern mit an den Außenseiten aufgedampften reflektierenden Schichten als Spiegel befestigt ist und einen Meßkammereinlaß und einen Meßkammerauslaß besitzt.

Die Strahlungsquelle und der Detektor sind gegenüberliegend, jeweils an der Rückseite der Spiegel, parallel versetzt zur optischen Achse,

angeordnet. Der von der Strahlungsquelle emittierte Strahl gelangt durch ein Eintritts-Fenster im Eintritts-Spiegel in die Meßküvette und tritt, nachdem er infolge von Reflexionen das zu untersuchende Medium mehrfach durchlaufen hat, durch ein Austritts-Fenster an dem gegenüberliegenden Austritts-Spiegel wieder aus, wo er auf den Detektor trifft. Als Strahlungsquelle ist ein kohärenter Strahler, beispielsweise ein Laserstrahl, vorgesehen. Der Spiegel-Abstand d ist bei gerader Einstrahlungsrichtung so eingestellt, daß die Brennpunkte zusammenfallen und er damit gleich dem doppelten Krümmungsradius R der Spiegel ist. Das Verhältnis d/R ist demnach zwei.

Bei der bekannten Meßzelle ist es von Nachteil, daß der Spiegel-Abstand d nicht veränderbar und damit nicht auf unterschiedliche Absorptionslängen einstellbar ist. Außerdem ist die hier vorliegende mehrfache, parallel zur optischen Achse verlaufende Strahlreflektion nur mit einer kohärenten Strahlungsquelle, z.B. einem Laser, realisierbar. Dieser läßt jedoch lediglich Messungen in einem eingeschränkten Frequenzbereich zu. Wird anstelle eines Laser eine breitbandige Strahlungsquelle verwendet, ist eine aufwendige Optik zur Fokussierung notwendig. Außerdem ist die Montage und Justierung der Strahlungsquelle und des Detektors, parallel versetzt zur optischen Achse, aufwendig und in kompakten Meßgeräten kaum durchführbar. Eine Einstrahlung auf der optischen Achse ist mit dieser Anordnung nicht möglich, da die Strahlung dann in sich selbst zurückgeworfen wird, bzw. ohne Reflektion auf den Detektor trifft. Durch die Verwendung eines Lasers

bzw. einer breitbandigen Strahlungsquelle mit Optik, verteuert sich die Meßzelle wesentlich in der Herstellung.

Aus der GB-A 21 05 058 ist ein Spektrometer zur Gasanalyse bekanntgeworden, bei dem eine Meßkammer von einer Strahlungsquelle mit totaler innerer Reflexion durchstrahlt wird. Vor und hinter der Meßkammer sind je ein Paar von sich gegenüberliegenden Spiegeln angeordnet, die vom Aufbau her einem sog. Clamshell-System entsprechen. Die Spiegelanordnungen dienen dazu, ein Zwischenbild der Strahlungsquelle direkt am Eingang der Meßkammer zu erzeugen, und am Ausgang der Meßkammer ein Zwischenbild auf den Detektor abzubilden.

Nachteilig bei der bekannten Anordnung ist, daß die beiden Spiegelanordnungen und die Meßkammer seriell im Strahlengang liegen und dadurch ein großes Bauvolumen entsteht. Ein derartiges Meßsystem ist in kompakten Geräten nicht einsetzbar.

Aus der US 38 61 809 ist ein optischer Gassensor bekannt mit einer Meßkammer innerhalb von zwei einander zugewandten sphärischen Spiegeln und mit einer Strahlungsquelle und einem Detektor auf der optischen Achse. Die Strahlungsquelle und der Detektor sind hinter den Spiegeln angeordnet und mit einem Reflektor zur Erzeugung einer parallelen Strahlung und einem Kollektor zur Fokussierung der Strahlung versehen.

Nachteilig bei dieser Anordnung ist, daß Strahlen mit einer unterschiedlichen Anzahl von Durchläufen d.h.

unterschiedlichen Absorptionslängen auf den Detektor treffen. Da bei jedem Strahldurchlauf Absorptions- und Reflexionsverluste auftreten, wird hierdurch das Nutzsignal gegenüber einer Anordnung mit gleicher Absorptionslänge für die einzelnen Strahlen geschwächt. Die konstruktive Ausführung mit insgesamt vier Spiegeln ist teuer und aufwendig von der Justage. Ein besonderer Kostenfaktor ist, daß das innere Spiegelpaar sowohl für Transmissions- als auch für Reflexionsstrahlung ausgelegt sein muß.

Der Neuerung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Meßzelle der genannten Art so zu verbessern, daß bei kleinem Bauvolumen unterschiedliche Absorptionslängen mit den gleichen Spiegeln eingestellt werden können, die Meßzelle einfach im Aufbau ist und die auf den Detektor treffenden Strahlen mit nahezu gleicher optischer Weglänge die Meßzelle durchlaufen haben.

Die Lösung der Aufgabe erfolgt dadurch, daß die Fenster auf der optischen Achse angeordnet sind und der Spiegel-Abstand d , d_1 , d_2 , d_3 , d_4 auf mindestens einen diskreten Wert derart einstellbar ist, daß die von einer divergierenden Strahlungsquelle aus dem achsennahen Bereich heraus emittierten Strahlen nach einer dem Spiegel-Abstand d , d_1 , d_2 , d_3 , d_4 zugeordneten Anzahl von ungeraden Strahldurchläufen auf den Detektor fokussiert sind, wobei das Verhältnis von Spiegel-Abstand d , d_1 , d_2 , d_3 , d_4 zu den zugehörigen Krümmungsradien R , R_1 , R_2 , R_3 kleiner eins ist.

Der Vorteil der Neuerung liegt im wesentlichen darin, daß über den Spiegel-Abstand d , d_1 , d_2 , d_3 , d_4

die Anzahl der Strahldurchläufe und damit die optische Weglänge verändert werden kann. Die Meßzelle besitzt eine große Absorptionslänge bei vergleichsweise kleinem Bauvolumen und zeichnet sich durch einfachen Aufbau und kostengünstige Fertigbarkeit aus. So können beispielsweise handelsübliche Spiegel aus Glas oder Metall benutzt werden ohne IR-Anforderungen an Transmission und ebenso gebräuchliche breitbandige, divergierende Strahlungsquellen. Durch die direkte Einstrahlung treten keine nennenswerten Intensitätsverluste durch Absorption oder Reflexion auf. Als Spiegel können paarweise sphärische, oder elliptische Ausführungen mit gleichen oder unterschiedlichen Krümmungsradien verwendet werden. Zur Kompensation von Abbildungsfehlern ist es zweckmäßig, sphärische mit elliptischen Spiegeln zu kombinieren.

Die eine divergente Strahlung aussendende Strahlungsquelle und der Detektor sind in der Umgebung der optischen Achse der Spiegel angeordnet. Die optische Strahlung gelangt durch ein Eintritts-Fenster in den Raum zwischen den Spiegeln, wird dort mehrfach reflektiert und dann auf den Detektor fokussiert, welcher sich im Austritts-Fenster des der Strahlungsquelle gegenüberliegenden Spiegels befindet. Die Fenster in den Spiegeln können entweder als offene Bohrungen ausgeführt oder mit optisch transparentem Material verschlossen sein. Der Detektor ist so justiert, daß er sich im Konvergenzpunkt der Strahlung mit der vorgewählten Anzahl von ungeraden Durchläufen befindet. Wegen der Divergenz der Strahlungsquelle ist eine Abschattung der direkten Strahlung der Strahlungsquelle von untergeordneter Bedeutung.

Untersuchungen hinsichtlich Streustrahlung haben gezeigt, daß die Anteile der Strahlung, die mit einer höheren oder niederen als der vorgewählten Anzahl von ungeraden Durchläufen reflektiert werden entweder divergent sind oder auf Punkte konvergieren, die vor oder hinter dem Detektor liegen.

Es ist zweckmäßig, die Strahlungsquelle unmittelbar innerhalb des Eintritts-Fensters und den Detektor innerhalb des Austritts-Fensters zu befestigen. Hierdurch ist eine besondere Justierung auf die optische Achse nicht mehr erforderlich, da die Strahlungsquelle und der Detektor unmittelbar mit den Spiegeln verbunden sind. Sofern die Fenster als Bohrungen ausgeführt sind, können die Strahlungsquelle und der Detektor zylinderförmige Module sein, die in die Bohrungen gesteckt werden.

Die Unteransprüche zeigen vorteilhafte Ausgestaltungen der Neuerung.

In einer bevorzugten Ausführungsform sind die Strahlungsquelle und der Detektor in den Schnittpunkten der Oberflächen der Spiegel mit der optischen Achse, d.h. in den Scheitelpunkten angeordnet. Um einen ungeraden Durchlauf der optischen Strahlung zwischen den Spiegeln zu erreichen, muß das Verhältnis von Spiegel-Abstand d zum Krümmungsradius R auf diskrete Werte eingestellt sein. Bei den d/R -Verhältnissen von dem Betrag 0.5, 0.69, 0.77, 0.826 ergibt sich ein 3-, 5-, 7- und 9-facher Durchlauf der optischen Strahlung. Diese d/R -Verhältnisse beziehen sich darauf, daß die Strahlungsquelle und der Detektor in den Schnittpunkten der Oberflächen der Spiegel mit der

optischen Achse angeordnet sind und die Spiegel gleichen Krümmungsradius R haben. Wird beispielsweise der Detektor innerhalb der Bohrung axial verschoben, muß der Spiegel-Abstand d so korrigiert werden, daß der Konvergenzpunkt der ungerade reflektierten Strahlung wieder den Detektor trifft. Der Spiegel-Abstand d bezieht sich allgemein auf einen n -fachen Strahldurchlauf. Bei dem Spiegel-Abstand d_1 liegt ein dreifacher - und bei d_2 ein fünffacher Strahldurchlauf vor.

Aus der klassischen Abbildungsoptik kann eine Rekursionsformel zur Berechnung der diskreten d/R -Verhältnisse entwickelt werden, die den Strahlverlauf von der Strahlungsquelle bis zum Detektor beschreibt. Durch die Reflexionen entsteht eine Folge von Abbildungen in Form von Zwischenbildern oder Bildpunkten, deren Lage durch eine Rekursionsformel beschreibbar ist. Das sich hieraus ergebende Gleichungssystem besitzt zwei Lösungen für das Verhältnis d/R , sofern der Durchlauf der optischen Strahlung größer drei ist. So liegt ein 5-, 7-, 9-facher Durchlauf der optischen Strahlung neben d/R gleich 0.69, 0.77, 0.826 auch bei Werten von d/R -Verhältnissen mit 0.19, 0.377, 0.234 vor. Je nach Krümmungsradius R der zu verwendenden Spiegel und Größe der Meßzelle ist ein geeignetes d/R -Verhältnis für den entsprechenden Strahldurchlauf auszuwählen.

In einer weiteren Ausführung der Meßzelle ist vorgesehen, daß die Spiegel unterschiedliche Krümmungsradien R_1 und R_2 haben und die Strahlungsquelle im Abstand l_s und der oder die Detektoren im Abstand l_D hinter den Spiegeloberflächen

im Bereich der Fenster angeordnet sind. Die Abstände l_s und l_D führen zu einem neuen Spiegel-Abstand d_3 der so bemessen ist, daß der Konvergenzpunkt des vorgewählten ungeraden Strahldurchlaufs wieder den Detektor trifft. Der Vorteil dieser Anordnung besteht im wesentlichen darin, daß der Konvergenzpunkt soweit hinter der Spiegeloberfläche liegt, daß durch Umlenkung des Strahls, z.B. mittels eines Strahlteilers, neben einem Detektor ein zusätzlicher Referenzdetektor anschließbar ist. Mit dem Referenzdetektor ist eine verbesserte Auswertung des Meßsignals durch eine Kompensation der Drift der Strahlerinentisät eine Kompensation der Transmission der Meßzelle möglich. Diese Anordnung enthält als Grenzfall auch die spezielle Ausführung, bei welcher der Detektor und die Strahlungsquelle im Schnittpunkt der Spiegeloberfläche mit der optischen Achse angeordnet sind. In den zugehörigen Rekursionsformeln sind für diesen Fall die Abstände l_s und l_D Null zu setzen.

In einer anderen Ausgestaltung der Meßzelle ist im Bereich des Austritts-Fensters ein Linsenkörper angebracht, mit dem die optische Weglänge des Abstands l_D verlängert werden kann. Als Linsenkörper ist beispielsweise eine plakonkave Linse geeignet, deren plane Fläche mit der Spiegeloberfläche abschließt. Der auf die Linse treffende Strahl wird von der optischen Achse weggebrochen, so daß sich der Konvergenzpunkt weiter von der Spiegeloberfläche des Austritts-Spiegels weg verschiebt. Hierdurch ergeben sich verbesserte Einbaumöglichkeiten, sofern der Strahl mit einem Strahlteiler auf einen Detektor und

Referenzdetektor umgelenkt werden soll. Ein weiterer Vorteil dieser Ausführung liegt darin, daß das Austritts-Fenster mit der Linse einen kleineren Durchmesser besitzt gegenüber einer reinen Fensteranordnung ohne Linse. Der reduzierte Durchmesser des Austritts-Fensters erhöht die wirksame Spiegeloberfläche und führt somit zu einem Intensitätsgewinn der Strahlung.

Eine zweckmäßige Ausführung der Meßzelle ist, daß die Spiegel gemeinsam in einem Gehäuse aufgenommen sind und der Innenraum des Gehäuses und die Oberflächen der Spiegel eine Meßkammer für das zu analysierende Gas bilden. Die Meßkammer ist mit einem Meßkammereinlaß und einem Meßkammerauslaß im Gehäuse versehen. Um eine Kondensation von Feuchtigkeit auf den Spiegeloberflächen zu verhindern, können Heizwicklungen am Gehäuse angebracht sein, die den Innenraum temperieren.

Ein Ausführungsbeispiel der Neuerung wird in der Zeichnung erläutert und ist im folgenden beschrieben.

Es zeigen:

Fig. 1 eine erste Meßzelle mit einem Spiegel-Abstand $d_1 = 0.5 \times R$ mit dreifachem Strahldurchlauf,

Fig. 2 eine zweite Meßzelle mit einem Spiegel-Abstand $d_2 = 0.69 \times R$ mit fünffachem Strahldurchlauf,

Fig. 3 den aufgefalteten Strahlengang für die zweite Meßzelle nach Fig. 2 und die

Berechnungsformeln für den
Spiegel-Abstand d_2 ,

Fig. 3A die allgemeinen Berechnungsformeln für den Spiegel-Abstand d für die erste und zweite Meßzelle nach Fig. 1 und Fig. 2,

Fig. 4 eine dritte Meßzelle mit fünffachem Strahldurchlauf und mit einer Strahlungsquelle und zwei Detektoren hinter den Spiegeloberflächen,

Fig. 5 den aufgefalteten Strahlengang der dritten Meßzelle nach Fig. 4 und die Berechnungsformeln für den Spiegel-Abstand d_3 ,

Fig. 5A die allgemeinen Berechnungsformeln für den Spiegel-Abstand d für die dritte Meßzelle nach Fig. 4,

Fig. 6 eine vierte Meßzelle mit plankonkaver Linse im Austritts-Fenster.

Fig. 1 zeigt schematisch (vergrößert) eine erste Meßzelle (1), bestehend aus einem Gehäuse (2), in welches ein Austritts-Spiegel (3) und ein Eintritts-Spiegel (4) eingesetzt sind. Die Spiegel (3, 4) sind sphärisch, haben gleichen Radius R und sind im Gehäuse (2) so justiert, daß sie einander zugewandt sind, auf der optischen Achse liegen und der Abstand d_1 zwischen den Schnittpunkten der Spiegeloberflächen (17) mit der optischen Achse dem halben Radius R entspricht. Der Innenraum des Gehäuses

(2) und die Spiegeloberflächen (17) der Spiegel (3, 4) bilden eine Meßkammer (9) für das zu analysierende Gas, welches durch einen Meßkammereinlaß (10) einströmt und einen Meßkammerauslaß (11) ausströmt. Die Spiegel (3, 4) haben auf der optischen Achse ein Austritts-Fenster (5) und ein Eintritts-Fenster (6), in welche ein Detektor (8) und eine divergente Strahlungsquelle (7) derart eingesetzt sind, daß sie sich auf dem Scheitelpunkt der Spiegeloberflächen (17) befinden. Der von der Strahlungsquelle (7) längs des Pfeiles (12) emittierte Strahl (13) durchdringt das Medium in der Meßkammer (9), trifft auf den Austritts-Spiegel (3), wird zum Eintritts-Spiegel (4) reflektiert und von diesem zum Detektor (8) abgelenkt. Bei dem vorliegenden Abstand d_1 von $0.5 \times R$ wird ein dreimaliger Durchlauf des Strahles (13) durch die Meßkammer (9) erreicht und der Konvergenzpunkt dieser Strahlung liegt auf dem Detektor (8).

Der in Fig. 1 gezeigte Strahl (13) gibt exemplarisch den Strahlverlauf innerhalb der Meßkammer (9) an, denn die divergente Strahlungsquelle (7) sendet eine Vielzahl von optischen Strahlen aus, die auf den Detektor (8) treffen. Wegen der Divergenz der Strahlungsquelle (7) ist eine Abschattung der direkten Strahlung auf den Detektor (8) nicht notwendig.

Fig. 2 zeigt schematisch eine zweite Meßzelle (200), bei der die Strahlungsquelle (7) und der Detektor (8) innerhalb der Fenster (5, 6) auf dem Scheitelpunkt der Spiegeloberflächen (17) angeordnet sind und deren Spiegel-Abstand d_2 auf den fünfachen Strahlungsdurchlauf eingestellt ist. Gleiche Symbole sind mit gleichen Bezugsziffern der Fig. 1 bezeichnet.

Der von der Strahlungsquelle (7) emittierte Strahl (213) trifft, nachdem er die Reflexionspunkte (221, 222, 223, 224) auf den Spiegeln (3, 4) durchlaufen hat auf den Detektor (8). Die zweite Meßzelle (200) unterscheidet sich von der ersten Meßzelle (1) dadurch, daß der Spiegel-Abstand statt $d_1 = 0.5 \times R$ auf den Wert $d_2 = 0.69 \times R$ eingestellt ist.

Fig. 3 gibt schematisch den aufgefalteten Strahlengang der zweiten Meßzelle (200) an. Der Strahl (213) wird zwischen den Spiegeln (3, 4) an den Reflexionspunkten (221, 222, 223, 224) reflektiert und trifft dann auf den Detektor (8). Nach den Gesetzen der klassischen Abbildungsoptik entstehen Zwischenbilder in den Bildpunkten (231, 232, 233), die, bezogen auf die zugehörigen Spiegel (3, 4), die Bildweiten a_2 , a_3 , a_4 haben. Die Darstellung der Bildweiten a_1 , a_2 , a_3 , a_4 erfolgt in dimensionsloser Form, bezogen auf den Krümmungsradius R . Der Spiegel-Abstand ist in dieser Darstellungsweise mit x bzw. a_1 bezeichnet.

Die Konvergenzbedingung für den Strahlengang ist, daß der vierte Bildpunkt (234) auf den Detektor (8) fällt, wodurch die zugehörige Bildweite a_5 zu Null wird.

Die Berechnungsformeln für den Spiegel-Abstand d_2 sind im unteren Teil der Fig. 3 als Rekursionsformel angegeben. Mit der Konvergenzbedingung $a_5 = 0$ ergibt sich ein Gleichungssystem für die vier Unbekannten a_4 , a_3 , a_2 und a_1 . Für $a_1 = x = d_2/R$ stellt der Wert 0.69 eine Lösung dar.

In Fig. 3A sind die allgemeinen Berechnungsformeln für den Spiegel-Abstand d bei den Strahldurchläufen $n = 3$,

5, 7, 9... angegeben. Der Stahlendurchlauf $n = 3$ entspricht der ersten Meßzelle (1) und der Strahlendurchlauf $n = 5$ der zweiten Meßzelle (200).

Fig. 4 zeigt schematisch eine dritte Meßzelle (300), deren Spiegel-Abstand d_3 auf den fünffachen Strahldurchlauf eingestellt ist, wobei jedoch im Gegensatz zu Fig. 2 die Spiegel (303, 304) unterschiedliche Krümmungsradien R_1, R_2 haben und die Strahlungsquelle (7) um den Abstand l_s und die Detektoren um den Abstand l_d hinter der Spiegeloberfläche angeordnet sind. Gleiche Symbole sind, wenn nicht anders bezeichnet, mit gleichen Bezugsziffern der Fig. 2 bezeichnet. Die dritte Meßzelle (300) besitzt im Austritts-Fenster (5), einen Strahlteiler (14), der den Strahl (313) auf den Detektor (8) und einen Referenzdetektor (15) umlenkt. Der Detektor (8) wird durch ein Interreferenzfilter (16) auf die Wellenlänge der Absorptionslinie der zu messenden Stoffkomponente in der Meßkammer (9) abgestimmt. Der Referenzdetektor (15) ist hingegen mit einem Filter (18) auf eine benachbarte Wellenlänge eingestellt, bei der diese Stoffkomponente eine deutlich geringere oder verschwindende Absorption zeigt. Die Ausgangssignale der Detektoren (8, 15) können in bekannter Weise mit einer Quotientenschaltung ausgewertet werden. Gegenüber der in Fig. 1 u. Fig. 2 gezeigten ersten Meßzelle (1) und zweiten Meßzelle (200) sind hier der Detektor (8) und der Referenzdetektor (15) hinter der Spiegel-Oberfläche (17) angeordnet. Diese zusätzliche optische Weglänge muß bei der Festlegung des Spiegel-Abstandes d_3 berücksichtigt werden. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal zur ersten Meßzelle

(1) bzw. zweiten Meßzelle (200) ist, daß die Spiegel (304, 303) unterschiedliche Krümmungsradien R_1 , R_2 besitzen. Die Umlenkung des Strahls (313) erfolgt an den Reflexionspunkten (321, 322, 323, 324).

Fig. 5 gibt schematisch den aufgefalteten Strahlengang der dritten Meßzelle (300) an. Die Strahlungsquelle (7) ist um den Abstand l_s und die Detektoren (8, 15) um den Abstand l_d hinter der Spiegeloberfläche (17), Fig. 4, der Spiegel (304) und (303) angeordnet.

Nach den Gesetzen der klassischen Abbildungsoptik entstehen Zwischenbilder in den Bildpunkten (331, 332, 333) mit den zugehörigen Bildweiten s_2 , s_3 , s_4 . Die Konvergenzbedingung für diesen Strahlengang ist, daß der vierte Bildpunkt (334) auf die Detektoren (8, 15) fällt und damit die Bildweite s_5 bezogen auf den Spiegel (303) gleich $s_5 = -l_d$ ist. Die Bildweite s_1 gibt den Abstand der Strahlungsquelle (7) von dem gegenüberliegenden Spiegel (303) an. Die in der Fig. 5 angegebenen Bildweiten s_1 , s_2 , s_3 , s_4 , s_5 sind dimensionsbehaftete Längen. Die Berechnung des Spiegel-Abstands d_3 erfolgt über die im unteren Teil der Fig. 5 angegebenen Rekursionsformeln. Mit der Konvergenzbedingung $s_5 = -l_d$ für den vierten Bildpunkt (334) ergibt sich ein Gleichungssystem für die vier Unbekannten s_4 , s_3 , s_2 und die gesuchte Bildweite s_1 .

In Fig. 5A sind die allgemeinen Berechnungsformeln für den Spiegel-Abstand d in Abhängigkeit von der Anzahl der Strahldurchläufe $n = 3, 5, 7, 9 \dots$ für die dritte Meßzelle (300) angegeben. Die Größen i , j und m sind

laufende Indices zur Entwicklung der Rekursionsformeln.

Fig. 6 zeigt schematisch eine vierte Meßzelle (400) mit fünffachem Strahldurchlauf, deren Spiegel (403, 404) gleichen Krümmungsradius R_3 besitzen und auf den Spiegel-Abstand d_4 eingestellt sind. Gleiche Symbole sind mit gleichen Bezugsziffern der Fig. 4 bezeichnet. Die von der Strahlungsquelle (7) emittierten Strahlen (413), von denen in der Fig. 6 nur einer dargestellt ist, durchdringen im Austritts-Fenster (405) eine plankonkave Linse (417), wo sie von der optischen Achse weggebrochen werden und gelangen dann über den Strahlteiler (14) zu den Detektoren (8, 15). Durch das Einschalten der plankonkaven Linse (417) wird die optische Weglänge, d.h. der Abstand l_D zwischen Spiegeloberfläche (17) und den Detektoren (8, 15) verlängert, was zu verbesserten Einbaumöglichkeiten für den Strahlteiler (14) und die Detektoren (8, 15) führt. Der Einfluß der plankonkaven Linse (417) auf den Abstand l_D muß in den Berechnungsformeln nach Fig. 5 bzw. Fig. 5A entsprechend berücksichtigt werden.

Ein weiterer Vorteil besteht darin, daß das Austritts-Fenster (405) im Spiegel (403) für die Linse (417) einen kleineren Durchmesser besitzt gegenüber der reinen Fensteranordnung wie sie bei der dritten Meßzelle (300) gezeigt ist. Die jetzt größer gewordene Spiegeloberfläche (17) des Spiegels (403) führt zu einem Intensitätsgewinn der Strahlung.

Schutzzansprüche

1. Meßzelle mit zwei parallelen, einander zugewandten konkaven Spiegeln (3, 4) auf der optischen Achse, mit Krümmungsradius R und Spiegel-Abstand d auf der optischen Achse, zwischen denen eine Mehrfachreflexion der optischen Strahlung erfolgt und mit Fenstern (5, 6) in den Spiegeln (3, 4) zum Eintritt der optischen Strahlung aus einer Strahlungsquelle (7) und Austritt der optischen Strahlung auf einen Detektor (8), dadurch gekennzeichnet, daß die Fenster (5, 6, 405) auf der optischen Achse angeordnet sind und der Spiegel-Abstand d, d_1, d_2, d_3, d_4 auf mindestens einen diskreten Wert derart einstellbar ist, daß die von einer divergenten Strahlungsquelle (7) aus dem achsennahen Bereich heraus emittierten Strahlen (13, 213, 313, 413) nach einer dem Spiegel-Abstand d, d_2, d_2, d_3, d_4 zugeordneten Anzahl von ungeraden Strahldurchläufen auf den Detektor (8, 15) fokussiert sind, wobei das Verhältnis von Spiegel-Abstand d, d_1, d_2, d_3, d_4 zu den zugehörigen Krümmungsradien R, R_1, R_2, R_3 kleiner eins ist.
2. Meßzelle nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Spiegel (3, 4) gleichen Krümmungsradius R besitzen, die Strahlungsquelle (7) und der Detektor (8) im Schnittpunkt der Spiegeloberfläche (17) mit der optischen Achse angeordnet sind und die Verhältnisse von Spiegel-Abstand d zu Krümmungsradius R den Betrag 0.5, 0.69, 0.77 und 0.826 haben, bei denen ein 3-, 5-, 7- und 9-facher Durchlauf der optischen Strahlung vorliegt.

3. Meßzelle nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Strahlungsquelle (7) im Abstand l_s und der Detektor (8, 15) im Abstand l_D hinter den Spiegeloberflächen (17) angeordnet sind und daß die von der Strahlungsquelle (7) emittierten Strahlen (313) nach einer dem Spiegel-Abstand d_3 zugeordneten Anzahl von ungeraden Strahldurchläufen auf den Detektor (8, 15) fokussiert sind.
4. Meßzelle nach Anspruch 1 oder 3, dadurch gekennzeichnet, daß im Bereich des Austritts-Fensters (405) ein Linsenkörper (417) vorgesehen ist.
5. Meßzelle nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Spiegel (3, 4, 303, 304, 403, 404) gemeinsam in einem Gehäuse aufgenommen sind und der Innenraum des Gehäuses (2) und die Spiegeloberflächen (17) eine Meßkammer (9) für das zu analysierende Gas mit einem Meßkammereinlaß (10) und einem Meßkammerauslaß (11) bilden.

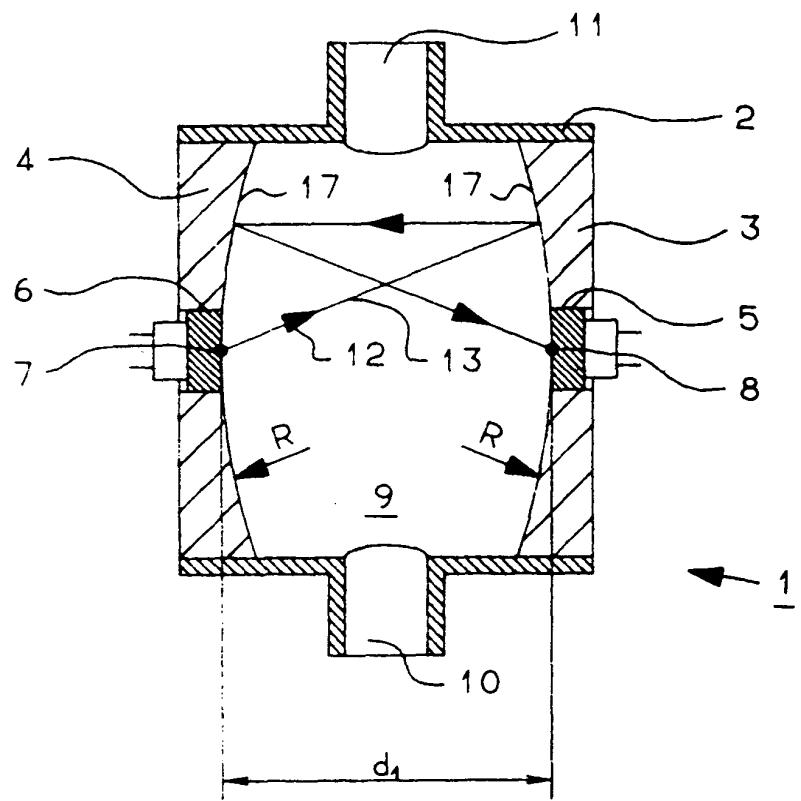


FIG.1

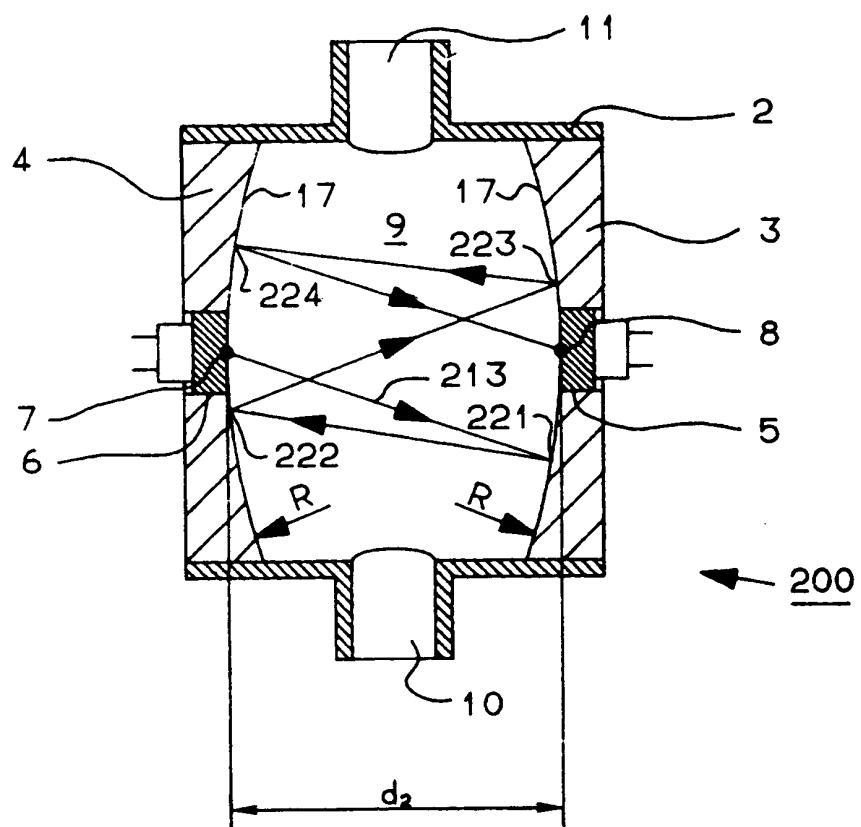
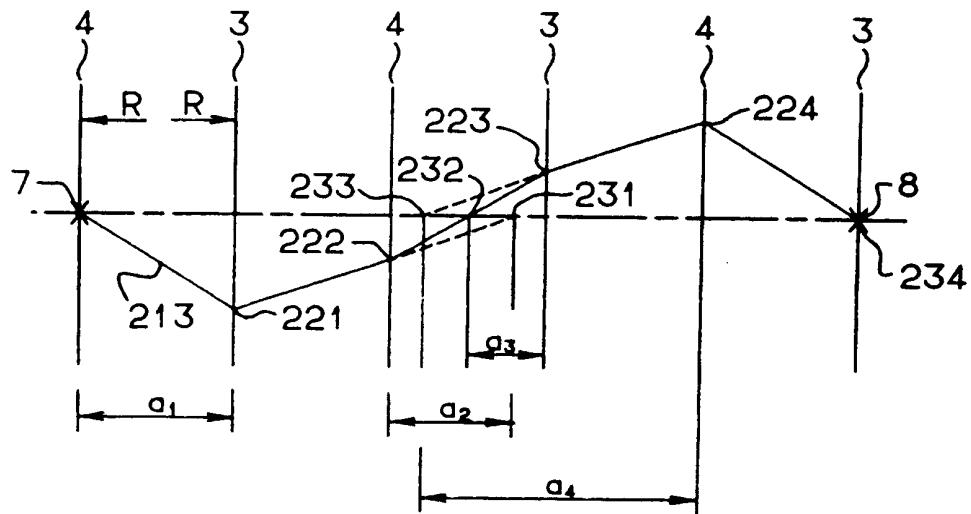


FIG.2



$$n = 5$$

$$a_1 = x \quad ; \quad x = \frac{d_2}{R}$$

$$a_2 = x - \frac{1}{2 - 1/a_1}$$

$$a_3 = x - \frac{1}{2 - 1/a_2}$$

$$a_4 = x - \frac{1}{2 - 1/a_3}$$

$$a_5 = 0 = x - \frac{1}{2 - 1/a_4}$$

FIG.3

$n = 3, 5, 7, 9, \dots$

$$a_1 = x \quad ; \quad x = \frac{d}{R}$$

$$a_i = x - \frac{1}{2 - 1/a_{i-1}}$$

$$a_n = 0$$

$$i = 2, 3, \dots, n$$

FIG.3A

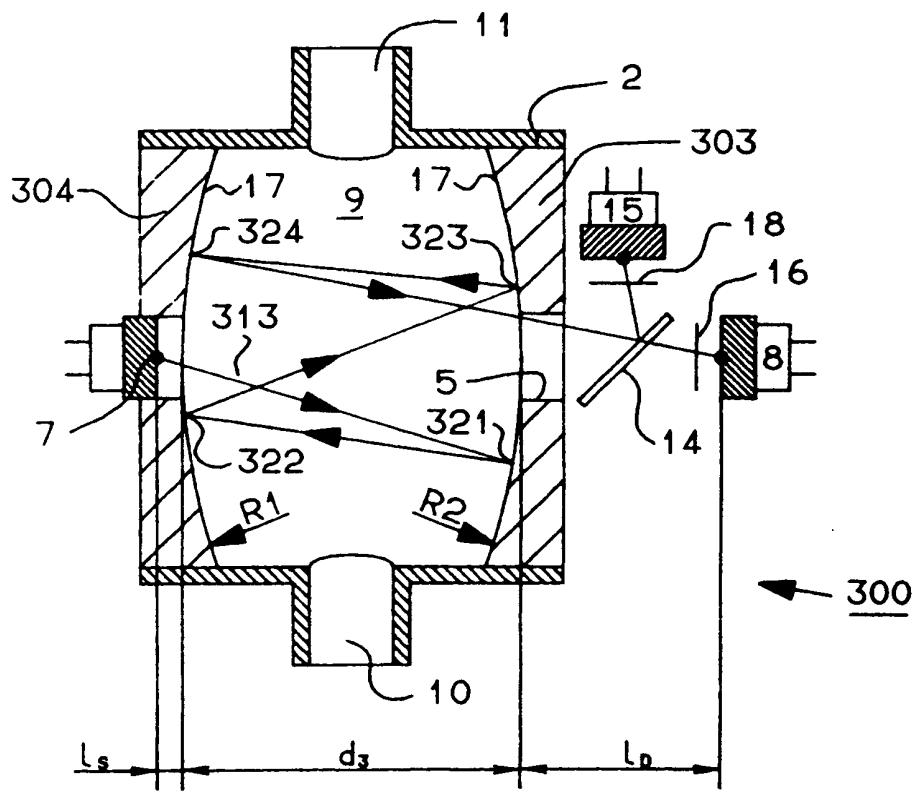
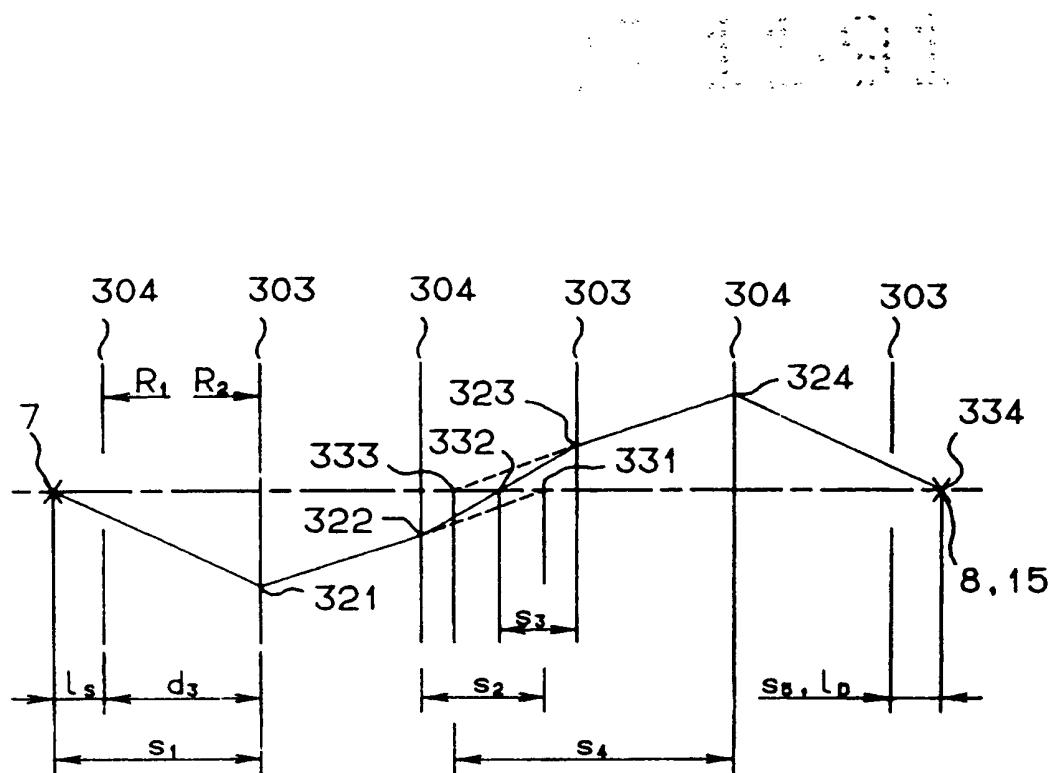


FIG. 4



$$n = 5$$

$$s_1 = d_3 + l_s$$

$$s_2 = d_3 - \frac{R_2}{2 - R_2/s_1}$$

$$s_3 = d_3 - \frac{R_1}{2 - R_1/s_2}$$

$$s_4 = d_3 - \frac{R_2}{2 - R_2/s_3}$$

$$s_5 = -l_0 = d_3 - \frac{R_1}{2 - R_1/s_4}$$

FIG.5

$n = 3, 5, 7, 9, \dots$

$$s_1 = d + l_s$$

$$s_i = d - \frac{R_2}{2 - R_2/s_{i-1}}$$

$$i = 2k \quad k = 1, 2, \dots \quad \frac{n-1}{2}$$

$$s_j = d - \frac{R_1}{2 - R_1/s_{j-1}}$$

$$j = 2m - 1 \quad m = 2, 3, \dots \quad \frac{n+1}{2}$$

$$s_n = -l_d$$

FIG.5A

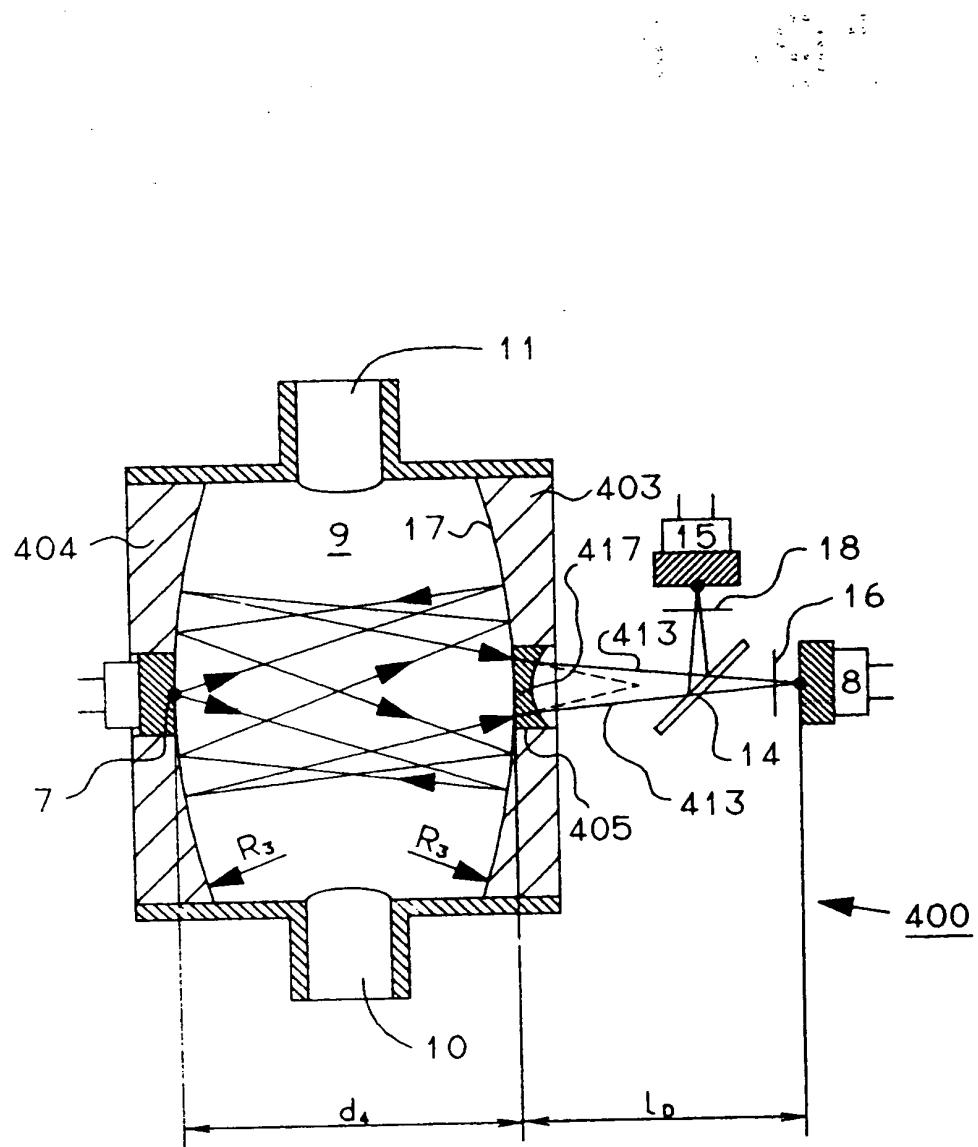


FIG. 6

G 90 17 745.2

A multiple reflection measuring cell

The improvement relates to a measuring cell having two parallel facing concave mirrors disposed on the optical axis, the mirrors having a curvature radius R and being spaced apart from one another by a distance d , a multiple reflection of the optical radiation occurring between the mirrors, the same having windows for the entry of the optical radiation from a radiation source and its exit to a detector.

A measuring cell having two facing mirrors between which a multiple reflection of the optical radiation used occurs is known from DE-C2 29 37 352. The known measuring cell is used as a multipass arrangement in absorption, fluorescence and Raman spectroscopy, the gas which it is required to analyse entering a measuring chamber which is secured between two convex members having on their outsides vapour-coated reflecting layers as mirrors, a measuring chamber inlet and a measuring chamber outlet.

The radiation source and the detector are disposed opposite one another in each case on the back of the mirrors with a parallel offset from the optical axis. The beam emitted by the radiation source passes through an entry window in the entry mirror into the measuring chamber and, after multiple passages through the medium under examination as a result of reflections, through an exit or outlet window on the opposite exit mirror where the beam impinges on the detector. The radiation source is a coherent radiator, for example, a laser beam. The between-mirrors distance d is so adjusted when the direction of the input radiation is straight that the foci coincide and the said distance is therefore equal to twice the curvature radius R of the mirrors. The ratio d/R is therefore two.

A disadvantage of the known measuring cell is that the distance d cannot be varied and so cannot be adjusted to different absorption lengths. Also, the beam reflection which in this case is multiple and which extends parallel to the optical axis can



be produced only by means of a coherent radiation source, e.g. a laser. However, the laser permits only measurements in a limited frequency range. When a wide-band radiation source is used instead of a laser elaborate optics are necessary for focussing. Also, the mounting and adjustment of the radiation source and detector with a parallel offset from the optical axis is elaborate and hardly feasible in compact measuring apparatuses. An input radiation on the optical axis cannot be provided by this arrangement since the radiation is then thrown back into itself or impinges on the detector without reflection. The use of a laser or of a wide band radiation source with optics considerably increases the manufacturing costs of the measuring cell.

GB-A 21 05 058 discloses a gas analysis spectrometer wherein a measuring chamber is irradiated by a radiation source having total internal reflection. A pair of facing mirrors is disposed before and after the measuring chamber and by their construction correspond to a so-called clamshell system. The purpose of the mirror arrangements is to use an intermediate image of the radiation source directly at the measuring chamber entry and to form an intermediate image at the measuring chamber exit.

A disadvantage of the known arrangement is that the two mirror arrangements and the measuring chamber are disposed in series in the beam path so that the resulting construction is bulky. A measuring system of this kind cannot be used in compact equipment.

US 38 61 809 discloses an optical gas sensor having a measuring chamber inside two facing spherical mirrors and having a radiation source and a detector on the optical axis. The radiation source and the detector are disposed behind the mirrors and have a reflector to produce a parallel radiation and a collector for focussing the radiation.

A disadvantage of this arrangement is that beams with a different number of passages or passes - i.e., different absorption wavelengths - impinge on the detector. Since there are absorption and



reflection losses at each beam pass the useful signal is less than can be provided by an arrangement having an identical absorption length for the discrete beams. Construction, with its total of four mirrors, is expensive and adjustment is elaborate. A special cost factor is that the pair of mirrors must be designed for both transmission and reflection radiation.

The improvement is intended so to improve a measuring cell of the kind mentioned that adaptation to different absorption lengths can be provided by the same mirrors in a compact construction, the cell is of simple construction and the beams impinging on the detector pass through the cell over substantially the same optical path length. To solve the problem, according to the improvement the windows are disposed on the optical axis and the between-mirrors distance d , d_1 , d_2 , d_3 , d_4 is so adjustable to at least one discrete value that the beams of a divergent radiation source emitted from the region near the axis are focused on the detector (8, 15) after an odd-numbered number of passages, said number of passages being associated with the between-mirrors distance d , d_1 , d_2 , d_3 , d_4 , the ratio of said between-mirrors distance to the associated curvature radii R , R_1 , R_2 , R_3 , R_4 being less than one.

The main advantage of the improvement is that the number of beam passages and, therefore, the optical path length can be varied by means of the between-mirrors distance d , d_1 , d_2 , d_3 , d_4 . The cell has a substantial absorption length yet is comparatively compact and simple and cheap to manufacture. For instance, commercially available glass or metal mirrors can be used without IR transmission requirements and without the also conventional wide-band divergent radiation sources. Since irradiation is direct, there are no appreciable intensity losses due to absorption or reflection. As mirrors there can be used pairs of spherical or elliptical constructions having the same or different curvature radii. Conveniently, to compensate for imaging errors spherical mirrors are combined with elliptical mirrors.

The source transmitting a divergent radiation and the detector are disposed near the optical axis

of the mirrors. The optical radiation goes through an entry window into the space between the mirrors, is reflected there a number of times and then focused on the detector which is disposed in the exit window of the mirror opposite the radiation source. The windows in the mirrors can take the form either of open bores or be closed with optically transparent material. The detector is so adjusted as to be disposed at the convergence point of the radiation with the predetermined number of odd-numbered passages. Because of the divergence of the radiation source shading of the direct radiation thereof is of minor importance.

Scatter radiation tests have shown that the proportions of the radiation which are reflected with a number of odd-numbered passes higher or lower than the pre-selected number are either divergent or converge at points before or behind the detector.

Conveniently, the radiation source is secured directly inside the entry window and a detector is secured inside the exit window. This makes any special adjustment to the optical axis unnecessary since the radiation source and the detector are directly connected to the mirrors. If the windows are in the form of bores, the radiation source and the detector can be cylindrical modules which are pushed into the bores.

The sub-claims show advantageous developments of the improvement.

In a preferred embodiment the radiation source and the detector are disposed at the intersections of the surfaces of the mirrors with the optical axis - i.e., at the apexes. To produce an odd-numbered number of passages of the optical radiation between the mirrors, the ratio of the between-mirrors distance d to the curvature radius R must be adjusted to discrete values. d/R ratios of 0.5, 0.69, 0.77 and 0.826 provide a triple, quintuple, septuple and nonuple passage of the optical radiation. These d/R ratios are based on the fact that the radiation source and the detector are disposed at the intersections of the surfaces of the mirrors with the optical axis and that the mirrors have the same curvature radius R . If, for example, the detector is moved axially in the bore, the

distance d must be so corrected that the point of convergence of the odd-number-reflected radiation is correct for the detector. The distance d refers generally to an n -fold beam passage. The distance d_1 corresponds to a triple beam passage and the distance d_2 corresponds to a quintuple beam passage.

A recurrence formula for calculating the discrete d/R ratios which describes the beam passage from the radiation source to the detector can be developed from classical imaging optics. The reflections lead to a sequence of images in the form of intermediate images or picture dots whose position can be described by a recurrence formula. The resulting equation system has two solutions for the ratio d/R if the passages of the optical radiation are greater than three. Thus, a quintuple, septuple and nonuple passage of the optical radiation can occur not only at d/R equal to 0.69, 0.77 and 0.826 but also at d/R ratio values of 0.19, 0.377 and 0.234. An appropriate d/R ratio for the corresponding beam passage should be selected in accordance with the curvature radius R of the mirrors to be used and the size of the measuring cell.

In another construction of the measuring cell, the mirrors have different curvature radii R_1 and R_2 and the radiation source is at the distance l_s and the or each detector is at a distance l_D behind the mirror surfaces near the windows. The distances l_s and l_D lead to a new between-mirrors distance d_3 which is such that the convergence point of the pre-selected odd number of beam passages strikes the detector again. The main advantage of this arrangement is that the convergence point is disposed so far behind the mirror surface that by deflection of the beam e.g. by means of a beam splitter an additional reference detector can be connected in addition to a detector. The reference detector makes possible an improved evaluation of the measurement signal by compensating for the drift of radiator intensity and for the transmission through the cell. This arrangement contains as limit case the special construction in which the detector and the radiation source are disposed at the intersection of the mirror surface with the optical axis. In this case the distances l_s and l_D

have the values of zero in the associated recurrence formulae.

In another embodiment of the measuring cell a lens member is disposed near the exit window and enables the optical path length of the distance l_D to be lengthened. A suitable lens member is, for example, a plane-concave lens whose plane surface ends at the mirror surface. The beam striking the lens is broken away from the optical axis so that the convergence point is shifted further away from the surface of the exit mirror. This facilitates fitting if it is required to deflect the beam by means of a beam splitter to a detector and a reference detector. Another advantage of this construction is that the exit window with the lens has a smaller diameter than a purely lensless window arrangement. The reduced diameter of the exit window increases the effective mirror surface and therefore leads to a gain in radiation intensity.

In a convenient construction of the measuring cell, the mirrors are received together in a casing and the interior thereof and the surfaces of the mirrors form a measuring chamber for the gas to be analysed. The measuring chamber has an inlet and an outlet in the casing. To prevent moisture from condensing on the mirror surfaces heating windings which climatise the chamber can be used.

An embodiment of the improvement is illustrated in the drawings and will be described hereinafter.

In the drawings:

Fig. 1 shows a first measuring cell having a between-mirrors distance $d_1 = 0.5 \times R$ with a triple beam passage;

Fig. 2 shows a second measuring cell having a between-mirrors distance $d_2 = 0.69 \times R$ with a quintuple beam passage;

Fig. 3 shows the folded-open beam passage for the second cell shown in Fig. 2 and the formulae for calculating the between-mirrors distance d_2 ;



Fig. 3A shows the general formulae for calculating the between-mirrors distance d for the first and second cell of Fig. 1 and Fig. 2;

Fig. 4 shows a third measuring cell having a quintuple beam passage, a radiation source and, behind the mirror surfaces, two detectors;

Fig. 5 shows the folded-open beam passage of the third cell of Fig. 4 and the formula for calculating the between-mirrors distance d_3 ;

Fig. 5A shows the general formula for calculating the between-mirrors distance d for the third cell of Fig. 4, and

Fig. 6 shows a fourth measuring cell having a plane-concave lens in the exit window.

Fig. 1 shows diagrammatically and to an enlarged scale a first measuring cell 1 comprising a casing 2 into which an exit mirror 3 and an entry mirror 4 have been inserted. The mirrors 3, 4 are spherical, have the same radius R and are so adjusted in the casing 2 that they face one another, are disposed on the optical axis and the distance d_1 between the intersections of the mirror surfaces 17 with the optical axis corresponds to half the radius R . The interior of the casing 2 and the surfaces 17 of the mirrors 3, 4 form a measuring chamber 9 for the gas to be analysed, the gas entering through an inlet 10 and discharging through an outlet 11. The mirrors 3, 4 have on the optical axis an exit window 5 and an entry window 6 into which a detector 8 and a divergent radiation source 7 are so inserted as to be disposed at the apex of the mirror surfaces 17. The beam emitted by the radiation source 7 along the arrow 12 passes through the medium in the chamber 9, strikes the exit mirror 3, is reflected to the entry mirror 4 and deflected thereby to the detector 8. At the between-mirrors distance d_1 of $0.5 \times R$ a triple passage of the beam 13 through the chamber 9 is produced and the convergence point of this radiation lies on the detector 8.

The beam 13 shown in Fig. 1 is an exemplary illustration of the passage of the beam in the chamber 9, for the divergent radiation source 7

transmits a number of optical beams which strike the detector 8. Because of the divergence of the source 7 shading of the direct radiation from the detector 8 is unnecessary.

Fig. 2 diagrammatically illustrates a second measuring cell 200 wherein the source 7 and the detector 8 are disposed in the windows 5, 6 at the apex of the mirror surfaces 17 and their between-mirrors distance d_2 is adjusted to the quintuple beam passage. Like symbols have the same references as in Fig. 1.

The beam 213 emitted by the source 7, having passed through the reflection points 221 - 224 on the mirrors 3, 4 strikes the detector 8. The second cell 200 differs from the first cell 1 in that the between-mirrors distance is not $d_1 = 0.5 \times R$ but has been adjusted to the value $d_2 = 0.69 \times R$.

Fig. 3 diagrammatically illustrates the folded-open beam passage of the second cell 200. The beam 213 is reflected between the mirrors 3 and 4 at reflection points 221 - 224, then strikes the detector 8. According to the laws of conventional imaging optics, intermediate images arise at the image dots 231 - 233 and, referred to the associated mirrors 3, 4, have the image widths a_2 , a_3 and a_4 . The illustration of the image widths a_1 , a_2 , a_3 and a_4 is in dimensionless form referred to the curvature radius R . In this illustration the between-mirrors distance has the reference x and a_1 respectively. The convergence condition for the beam passage is that the fourth image dot 234 coincides with the detector 8 so that the associated image width a_5 becomes zero.

The formulae for calculating the distance d_2 are given in the bottom part of Fig. 3 as a recurrence formula. In the convergence condition $a_5 = 0$ an equation system for the four unknowns a_4 , a_3 , a_2 and a_1 results. For $a_1 = x = d_2/R$ the value 0.69 represents one solution.

Fig. 3 shows the general formulae for calculating the distance d for the beam passages $n = 3, 5, 7, 9 \dots$. The beam passage number $n = 3$ corresponds to the first measuring cell 1 and the

beam passage number $n = 5$ corresponds to the second cell 200.

Fig. 4 diagrammatically illustrates a third measuring cell 300 whose between-mirrors distance d_3 has been adjusted to the quintuple beam passage; however, in contrast to Fig. 2 the mirrors 303, 304 have different curvature radii R_1, R_2 and the radiation source 7 is disposed at the distance l_s behind the mirror surface and the detectors are disposed therebehind at the distance l_b therefrom. Unless otherwise stated like symbols have the same references as in Fig. 2. The third cell 300 has in the exit window 5 a beam splitter 14 which deflects the beam 313 to the detector 8 and to a reference detector 15. By means of an interference filter 16 the detector 8 is tuned to the wavelength of the absorption line of the component to be measured in the measuring chamber 9. The reference detector 15, however, is adjusted by means of a filter 18 to an adjacent wavelength at which the material component shows much less or vanishingly small absorption. The output signals of the detectors 8, 15 can be evaluated in known manner by means of a quotient circuit arrangement. In contrast to the first cell 1 shown in Figs. 1 and 2 and to the second cell 200, in this case the detector 8 and reference detector 15 are disposed behind the mirror surface 17. This additional optical path length must be considered in the determination of the between-mirrors distance d_3 . Another feature differing from the first cell 11 and second cell 200 is that the mirrors 304, 303 have different curvature radii R_1, R_2 . The beam 313 is deflected at the reflection points 321, 322, 323, 324.

Fig. 5 is a diagrammatic view of the opened-up beam path of the third cell 300. The source 7 is disposed behind the mirror surface 17 at a distance l_s therefrom and the detectors 8, 15 are disposed behind the mirror surface 17 at the distance l_b behind the mirror surface 17, Fig. 4, of the mirrors 304 and 303.

According to the laws of conventional imaging optics intermediate images arise at the picture dots 331, 332, 333 with the associated image widths s_2, s_3 and s_4 . The convergence condition for this beam path

is that the fourth image dot 334 falls on the detectors 8, 15 and so the image width s_5 referred to the mirror 303 is equal to $s_5 = -l_D$. The image widths s_1 indicates the distance between the source 7 and the facing mirror 303. The image widths s_1 , s_2 , s_3 , s_4 , and s_5 indicated in Fig. 5 are dimension related lengths. The distance d_3 is calculated by means of the recurrence formulae given in the lower part of Fig. 5. With the convergence condition $s_5 = -l_D$ for the fourth image dot 334 there arises an equation system for the four unknowns s_4 , s_3 , and s_2 and the required image width s_1 .

Fig. 5A shows the general formulae for calculating the distance d in dependence upon the number of beam passages $n = 3, 5, 7, 9 \dots$ for the third cell 300. The values i , j and m are current indices for developing the recurrence formulae.

Fig. 6 diagrammatically illustrates a fourth measuring cell 400 having a quintuple beam passage, the mirrors 403, 404 of the cell 400 having the same curvature radius R_3 and being adjusted to the between-mirrors distance d_4 . Like symbols have the same references as in Fig. 4. The beams 413 emitted by the source 7, only one such beam being shown in Fig. 6, pass through a plane-concave lens 417 in the exit window 405 and are broken away from the optical axis in the lens 417 and then go through the beam splitter 14 to the detectors 8, 15. The introduction of the lens 417 lengthens the optical path length - i.e., the distance l_D between the mirror surface 17 and the detectors 8, 15, thus improving the possibilities for fitting the beam splitter 14 and the detectors 8, 15. The effect of the lens 417 on the distance l_D must be considered correspondingly in the calculation formulae of Fig. 5 and Fig. 5A respectively.

Another advantage is that the exit window 405 in the mirror 403 for the lens 417 must be of smaller diameter than in the case of the pure window arrangement as shown in connection with the third cell 300. The thus increased mirror surface 17 of the mirror 403 increases the intensity of the radiation.



Claims

1. A measuring cell having two parallel facing concave mirrors (3, 4) disposed on the optical axis, the mirrors having a curvature radius R and being spaced apart from one another by a distance d , a multiple reflection of the optical radiation occurring between the mirrors, the same having windows (5, 6) for the entry of the optical radiation from a radiation source (7) and its exit onto a detector (8), characterised in that the windows (5, 6, 405) are disposed on the optical axis and the between-mirrors distance d , d_1 , d_2 , d_3 , d_4 is so adjustable to at least one discrete value that the beams (13, 213, 313, 413) of a divergent radiation source (7) emitted from the region near the axis are focused on the detector (8, 15) after an odd number of passages, said number of passages being associated with the between-mirrors distance d , d_1 , d_2 , d_3 , d_4 , the ratio of said between-mirrors distance to the associated curvature radii R , R_1 , R_2 , R_3 , R_4 being less than one.
2. A measuring cell according to claim 1, characterised in that the mirrors 3, 4 have the same curvature radius R , the radiation source (7) and the detector (8) are disposed at the intersection of the mirror surface (17) with the optical axis and the ratios of the between-mirrors distance d to the curvature radius R are 0.5, 0.69, 0.77 and 0.826, at which values there occur 3, 5, 7 and 9 passages respectively of the optical radiation.
3. A measuring cell according to claim 1, characterised in that the radiation source (7) is disposed at a distance l_s , and the detector (8, 15) at a distance l_D , behind the mirror surfaces (17) and the beams (313) emitted by the radiation source (7) are, after making an odd number of passages, the latter number being associated with the between-mirrors spacing d_3 , focused on the detector.
4. A measuring cell according to claim 1 or claim 3, characterised in that a lens member (417) is disposed near the exit window (405).
5. A measuring cell according to any of claims 1 to 4, characterised in that the mirrors (3, 4, 303, 304, 403, 404) are received together in a casing (2) and the interior thereof and the mirror surfaces (17) form a

measuring chamber (9) for the gas under analysis and have a measuring chamber inlet (10) and a measuring chamber outlet (11).

